

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ ES 2004/000378

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC7 G 02 B 6/28, G 02 F 1/365

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC7 G 02 B, G 02 F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CIBEPAT,EPODOC, WPI, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A.	US 6101300 A (FAN, S. et al.) 08.08.2000, column 2, line 16 - column 3, line 5; column 5, lines 33 - 49; column 6, lines 9 - 25; column 12, line 55 - column 13, line 39; figures 3, 13.	1 - 7
P, A	FR 2841658 A1 (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS) 02.01.2004, page 2, line 3 - page 3, line 25; page 5, line 15 - page 6, line 7; page 6, line 20 - page 7, line 13; page 10, line 20 - page 11, line 16; figures 1, 2, 5 - 7.	1 - 7
P, A	US 2004/0033009 A1 (SOLJACIC, M. et al.) 19.02.2004, abstract; paragraphs [0042] - [0056]; figure 5.	1 - 7

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

10 November 2004 (10.11.04)

Date of mailing of the international search report

12 November 2004 (12.11.04)

Name and mailing address of the ISA/

S.P.T.O.

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/ ES 2004/000378

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 6101300 A	08.08.2000	CA 2293660 A	17.12.1998
		WO 9857207 A	17.12.1998
		EP 0988569 A	29.03.2000
		US 6130969 A	10.10.2000
		JP 2001508887T T	03.07.2001
		US 2002118923 A	29.08.2002
		US 6512866 B	28.01.2003
FR 2841658 AB	02.01.2004	WO 2004003610 A	08.01.2004
US 2004033009 A	19.02.2004	WO 03091775 A	06.11.2003

INFORME DE BUSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional n°

PCT/ ES 2004/000378

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

CIP⁷ G 02 B 6/28, G 02 F 1/365

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y la CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

CIP⁷ G 02 B, G 02 F

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

CIBEPAT, EPODOC, WPI, PAJ

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones n°
A.	US 6101300 A (FAN, S. et al.) 08.08.2000, columna 2, línea 16 - columna 3, línea 5; columna 5, líneas 33 - 49; columna 6, líneas 9 - 25; columna 12, línea 55 - columna 13, línea 39; figuras 3, 13.	1 - 7
P, A.	FR 2841658 A1 (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS) 02.01.2004, página 2, línea 3 - página 3, línea 25; página 5, línea 15 - página 6, línea 7; página 6, línea 20 - página 7, línea 13; página 10, línea 20 - página 11, línea 16; figuras 1, 2, 5 - 7.	1 - 7
P, A	US 2004/0033009 A1 (SOLJACIC, M. et al.) 19.02.2004, resumen; párrafos [0042] - [0056]; figura 5.	1 - 7

☐ En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos ☒ Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

* Categorías especiales de documentos citados:	"T"	documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.	"X"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.	"Y"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.
"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).	"&"	documento que forma parte de la misma familia de patentes.
"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.		
"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.		

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.

10.Noviembre.2004 (10.11.2004)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional O.E.P.M.

C/Panamá 1, 28071 Madrid, España.

N° de fax 34 91 3495304

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional

12 NOV 2004 12. 11. 2004

Funcionario autorizado

O. González Peñalba

N° de teléfono + 34 91 3495393

INFORME DE BUSQUEDA INTERNACIONAL

Información relativa a miembros de familias de patentes

Solicitud internacional nº

PCT/ ES 2004/000378

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de publicación
US 6101300 A	08.08.2000	CA 2293660 A WO 9857207 A EP 0988569 A US 6130969 A JP 2001508887T T US 2002118923 A US 6512866 B	17.12.1998 17.12.1998 29.03.2000 10.10.2000 03.07.2001 29.08.2002 28.01.2003
FR 2841658 AB	02.01.2004	WO 2004003610 A	08.01.2004
US 2004033009 A	19.02.2004	WO 03091775 A	06.11.2003

**MÉTODO PARA DIVIDIR UNA SEÑAL ELECTROMAGNÉTICA GUIADA EN
DOS SEÑALES CON LA MITAD DE POTENCIA UTILIZANDO CRISTALES
FOTÓNICOS**

5

DESCRIPCIÓN

OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención consiste en un método que
10 permite dividir la potencia de una señal electromagnética
de entrada en dos señales de igual potencia con un desfase
relativo entre ellas de 180° e igual retardo de
propagación. Dicho método hace uso de un acoplador
consistente en dos guías paralelas implementadas en un
15 cristal fotónico situadas en proximidad. Se podría hacer
uso tanto de cristales fotónicos bidimensionales (2D) como
tridimensionales (3D) ya que el concepto subyacente es el
mismo. Las ventajas de la estructura divisora son su
reducido tamaño, lo que la hace apropiada para integración
20 de numerosas unidades divisoras como unidades funcionales
de dispositivos más complejos, el elevado ancho de banda de
funcionamiento, que supone una ventaja respecto a otros
métodos de división de potencia que son sensibles a la
frecuencia, y sincronismo entre las señales de salida del
25 dispositivo, requisito imprescindible para el procesado de
señales de alta velocidad.

La presente invención tiene su campo de aplicación en
cualquier dispositivo basado en tecnología de cristales
30 fotónicos 2D o 3D y diseñado para funcionar en cualquier
rango de frecuencias, desde señales ópticas y de
microondas/milimétricas hasta señales con frecuencias en el
visible o en el infrarrojo.

35

- 2 -

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Los cristales fotónicos están formados por materiales con una constante dieléctrica que varía de forma periódica en una, dos o tres dimensiones espaciales. Esta periodicidad da lugar a la aparición de bandas de frecuencias en las que la propagación de señal no está permitida en el interior del cristal. Estas bandas prohibidas se conocen comúnmente en terminología anglosajona como *Photonic Band Gap (PBG)*. El control de la propagación de la luz se puede conseguir mediante la inserción de defectos que alteran la periodicidad del cristal. La inserción de defectos lineales provoca la aparición de modos guiados con frecuencias dentro de la banda prohibida permitiendo la propagación de la luz únicamente en el defecto creado. Aunque el control total de la propagación de la luz se consigue utilizando cristales fotónicos 3D, el control de la luz en tres dimensiones puede también conseguirse con cristales fotónicos planares 2D, reduciendo así el coste y complejidad de fabricación. En este caso la luz queda confinada en la dirección perpendicular al plano del cristal si la constante dieléctrica de los materiales por encima y por debajo del cristal es menor a la constante dieléctrica del defecto creado en el cristal. Las principales ventajas de los dispositivos basados en cristal fotónico son una reducción considerable de su tamaño permitiendo el desarrollo de circuitos ópticos de alto nivel de integración y la posibilidad de implementar guías curvadas con radios del orden de la longitud de onda de la señal que se propaga sin pérdidas significativas, lo que es fundamental para el desarrollo de la microfotónica.

Debido a la propiedad de escalado de las ecuaciones de Maxwell, se pueden implementar cristales fotónicos que tengan una banda prohibida en cualquier rango espectral si se escala convenientemente la estructura y si se escogen

- 3 -

materiales que presenten las propiedades adecuadas en el margen espectral elegido. Como resulta altamente costoso fabricar estructuras a frecuencias de infrarrojos o visible, en las que la periodicidad espacial debe estar por
5 debajo de una micra, se han implementado cristales fotónicos y funcionalidades basadas en ellos a frecuencias de microondas donde la periodicidad es del orden de cm. Para ello se suelen utilizar barras de material dieléctrico de alto índice que forman redes periódicas en aire. Las
10 propiedades que presentan estas estructuras son en gran parte extrapolables a las estructuras correspondientes a frecuencias ópticas, pero con la ventaja de que a frecuencias de microondas resulta mucho más sencilla tanto la fabricación como la medida de propiedades.

15

En un cristal fotónico se puede crear una guía de onda a partir de una cadena de cavidades o defectos puntuales equiespaciados a lo largo de una determinada dirección del cristal. Este tipo de guías se conoce como guía de
20 cavidades acopladas. La propagación en estas guías se puede explicar como salto de fotones entre cavidades adyacentes debido al solapamiento de las colas de campo evanescente. Las guías de cavidades acopladas poseen varias características que las hacen especialmente interesantes:
25 por un lado se puede derivar una expresión teórica para la relación de dispersión de los modos guiados a partir del formalismo de ligadura fuerte (*Tight-Binding* en terminología anglosajona) empleado en física de estado sólido. Por otra parte, la transmisión a través de curvas
30 con radio de curvatura muy pequeño es muy eficiente siempre que la simetría del modo de la cavidad sea la indicada. Además, la velocidad de grupo en este tipo de guías es muy baja, tendiendo a cero en los bordes de banda, por lo que es de esperar una alta eficiencia de procesos no lineales
35 en este tipo de guías, así como una alta dispersión que podría encontrar uso adecuado en numerosas aplicaciones.

- 4 -

Por otra parte, los acopladores en tecnología de cristales fotónicos se pueden implementar del mismo modo que utilizando otras tecnologías más maduras, como guías integradas o fibra óptica: colocando en proximidad dos guías de onda paralelas. Suponiendo que ambas guías sean idénticas y monomodo al colocarlas en proximidad hay interacción entre ambas y el modo guiado de una guía aislada se descompone en dos modos para el sistema completo de las dos guías de onda paralelas. Estos modos tienen simetrías par e impar con respecto al plano equidistante de los ejes de las guías. Además, dichos modos tienen diferentes constantes de propagación lo que implica que viajan a diferente velocidad por el acoplador. Este comportamiento provoca que si se excita señal en una de las dos guías, la onda pase al cabo de cierta distancia a la guía contigua y, de nuevo, vuelva a la guía original al cabo de recorrer la misma distancia vuelva a la guía que la contenía originalmente. Es decir, hay una transferencia periódica de potencia entre las guías. En cristales fotónicos 2D se han propuesto y estudiado acopladores formados por guías constituidas al eliminar totalmente una fila de cilindros en estructuras de cilindros dieléctricos sobre aire. También se ha demostrado experimentalmente el funcionamiento de un acoplador direccional a frecuencias ópticas en un cristal fotónico planar de agujeros de aire sobre un sustrato de silicio. Además, se ha propuesto un acoplador en un cristal fotónico 2D de agujeros de aire en dieléctrico para aplicaciones de conmutación.

Los divisores/combinadores de potencia son bloques fundamentales en cualquier dispositivo o red óptica. Su función es repartir la potencia de una señal de entrada en dos puertos de salida con determinados porcentajes en cada salida. Si los porcentajes son del 50% el divisor se suele denominar divisor de 3 dB. Estos bloques se pueden implementar principalmente de dos formas (ver Figuras 1a y 1b): bien usando un acoplador direccional diseñado de tal

- 5 -

forma que a su salida la potencia se halle igualmente repartida entre los puertos de salida (Figura 1a), o bien por medio de una estructura en Y en la que la guía de entrada se bifurca en dos guías de salida con un determinado ángulo para minimizar pérdidas (Figura 1b). Para el primer caso, el desfase entre las señales de salida es de 90° mientras que para el segundo caso ambas salidas están en fase. Además de acopladores también se ha propuesto la implementación de bifurcaciones en Y en tecnología de cristales fotónicos y se ha demostrado experimentalmente a frecuencias tanto de microondas como ópticas.

15 DESCRIPCION DE LA INVENCION

Se refiere a un método que permite dividir la potencia de una señal electromagnética de entrada en dos señales de igual potencia con un desfase relativo entre ellas de 180° e igual retardo de propagación. La estructura también puede diseñarse para que el desfase entre señales de salida sea de 0° aunque en cualquier caso las señales de salida recorren el mismo camino físico y están en sincronismo entre sí.

25

Dicho método hace uso de un acoplador implementado en cristal fotónico y consistente en dos guías paralelas situadas en proximidad y basadas en cavidades acopladas.

30 El fundamento físico del método propuesto se basa en excitar el modo impar del acoplador, que por su simetría hace coincidir máximos de campo en una guía con mínimos en la guía adyacente consiguiéndose por tanto un desfase relativo de 180 grados. Las dos señales de salida se
35 obtienen mediante la separación espacial de las guías que componen el acoplador, haciendo uso de la propiedad que poseen las guías en cristales fotónicos de alta eficiencia

- 6 -

de transmisión a través de curvas muy cerradas y lo que permite reducir considerablemente el tamaño de la estructura.

- 5 El método es válido tanto con cristales fotónicos bidimensionales (2D) como tridimensionales (3D) ya que el concepto subyacente es el mismo.

10 Las ventajas de la estructura divisora son su reducido tamaño, lo que la hace apropiada para integración de numerosas unidades divisoras como unidades funcionales de dispositivos más complejos, gran ancho de banda y la sincronización de las dos señales de salida de la estructura, que permite el procesamiento de señales de alta
15 velocidad.

Mediante el mismo método se podría conseguir un divisor con las señales de salida en fase si en vez del modo impar se utiliza el modo par del acoplador.
20

El cristal fotónico comprende una red de cilindros agrupados en columnas que puede adoptar cualquier valor de constante de red (distancia entre cilindros más próximos entre sí), así como cualquier radio y altura de los
25 cilindros. Asimismo el método es de aplicación para cualquier contraste de índices de refracción entre el material de las columnas, el material que rodea las columnas y el material por encima y por debajo del cristal

30 Los cristales fotónicos pueden adoptar cualquier tipo de red, en especial red triangular o red cuadrada.

La guía dieléctrica puede tener cualquier tipo de configuración para crear el acoplador, (anchura y altura del
35 núcleo y capas que lo rodean), así como cualquier índice de refracción, incluyéndose también la fibra óptica.

- 7 -

El método es asimismo de aplicación para cualquier tipo de guía en cristal fotónico que se use para inyectar y extraer las señales de la región de acoplo.

5

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

15

Las Figuras **1a** y **1b** muestran las estructuras de uso más extendido en circuitos ópticos para dividir la potencia de una señal de entrada en dos puertos de salida: la Figura **1a** muestra un acoplador direccional en el que se produce una transferencia periódica de potencia entre guías de forma que escogiendo apropiadamente la longitud del acoplador se puede obtener una determinada relación de potencias en los puertos de salida. La Figura **1b** muestra un divisor en forma de Y en el que la guía de entrada se bifurca en dos guías de salida de forma que ambas llevarán la misma potencia.

La Figura 2 muestra el esquema de un cristal fotónico 2D con simetría hexagonal con estructura periódica en las direcciones ΓK y ΓM , mientras que permanece invariante en la dirección perpendicular al plano de periodicidad.

La Figura 3 muestra una guía de onda creada en el cristal fotónico mostrado en la Figura 2 eliminando una fila de columnas de alto índice en la dirección ΓK .

- 8 -

La Figura 4 muestra una guía de cavidades acopladas creada en el cristal fotónico mostrado en la Figura 2 eliminando una de cada dos columnas de alto índice en la dirección ΓK .

5

La Figura 5 muestra un acoplador creado en el cristal fotónico mostrado en la Figura 2 consistente en dos guías como las mostradas en la Figura 3 paralelas y separadas por tres filas de cilindros de alto índice.

10

La Figura 6 muestra un acoplador de guías de cavidades acopladas creado en el cristal fotónico mostrado en la Figura 2.

15

La Figura 7 muestra la estructura de bandas de los modos guiados con polarización TM de una guía como la mostrada en la Figura 3 (línea discontinua) y de un acoplador como el mostrado en la Figura 5.

20

La Figura 8 muestra la estructura de bandas de los modos guiados con polarización TM de una guía de cavidades acopladas como la mostrada en la Figura 4 (línea discontinua) y de un acoplador de guías de cavidades acopladas (línea continua) como el mostrado en la Figura 6

25

y que constituye la sección de acoplo de la Figura 9.

La Figura 9 muestra un esquema de una posible realización de la presente invención: la parte central de la estructura, resaltada en un rectángulo discontinuo en la Figura 9, muestra la sección de acoplo que está formada por un acoplador de guías de cavidades acopladas consistente en N cavidades (en concreto $N = 5$) como el mostrado en la Figura 6.

35

La Figura 10 muestra el patrón del campo eléctrico paralelo al eje de los cilindros para una onda

- 9 -

monocromática de frecuencia normalizada 0.44 c/a , siendo c la velocidad de la luz en el vacío (dentro del rango operativo del acoplador) que se inyecta en la estructura de división de potencia mostrada en la Figura 9.

5

La Figura 11 muestra el espectro de transmisión de potencia de la realización preferida de la estructura mostrada en la Figura 9 para los casos particulares $N = 4$ y $N = 6$.

10

La Figura 12 muestra la respuesta experimental en amplitud (a) y fase (b) de la realización preferida usando 300 cilindros de alúmina con $a = 1.5 \text{ cm}$.

15

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

La Figura 1 muestra las dos estructuras que se usan ampliamente en circuitos ópticos para dividir la potencia de una señal de entrada en dos puertos de salida: la Figura 1a muestra un acoplador direccional formado por dos guías iguales paralelas próximas entre si en el que se produce una transferencia periódica de potencia entre guías en la región de acoplo (4) de forma que escogiendo apropiadamente la longitud del acoplador se puede obtener una determinada relación de potencias en los puertos de salida (2)-(3). Si esta relación es de 50% en cada puerto, es decir, la potencia de la señal de entrada (1) se reparte igualmente entre puertos de salida (2)-(3), el desfase relativo entre ellos es de 90° . En el puerto de entrada (5) no se inyecta potencia. Debido a la dependencia del acoplo con la frecuencia, la división exacta de 50% se produce sólo para una frecuencia, aunque en un margen espectral alrededor de esa frecuencia la división será también muy cercana al 50%. La Figura 1 b muestra un divisor en forma de Y en el que la guía de entrada (6) se bifurca en dos guías de salida (8)-(9) de forma que ambas guían la misma potencia. El

-10-

ángulo de las guías de salida debe diseñarse con el objetivo de maximizar la potencia en cada una de las guías de salida. También se debe diseñar apropiadamente la zona de bifurcación (7). Ambas estructuras se pueden implementar en tecnología de cristales fotónicos 2D y 3D. Estas dos estructuras se describen con el propósito de compararlas posteriormente con la invención que aquí se detalla y mostrar las ventajas que la presente invención posee con respecto a ellas.

10

Para describir la presente invención y ofrecer resultados que verifiquen su comportamiento se elige como realización preferida una implementación en un cristal fotónico 2D como el mostrado esquemáticamente en la Figura 2. Este cristal fotónico consiste en una red hexagonal con parámetro constante de red a (distancia entre el centro de los cilindros más próximos entre sí) de cilindros dieléctricos (10) de alto índice de refracción (permitividad ϵ_1) y radio r sobre un medio (11) de bajo índice de refracción (permitividad ϵ_2). La estructura es periódica en el plano en el que se distribuyen los cilindros y que vendrá descrito por las direcciones ΓK y ΓM , mientras que es invariante en la dirección perpendicular al plano de periodicidad. Este cristal fotónico posee una banda prohibida para modos con polarización transversal magnética (TM), es decir modos con el campo eléctrico en la dirección perpendicular al plano del cristal. Esta realización se escoge para una verificación a frecuencias de microondas en laboratorio. Sin embargo, la presente invención podría ser realizada en cristales 2D con simetría cuadrada, con otro tipo de forma transversal de los cilindros, intercambiando los materiales de alto y bajo índice, e incluso utilizando un cristal fotónico 3D sin pérdida de generalidad.

35

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de una guía de

-11-

onda (12) creada en el cristal fotónico 2D de la Figura 2 mediante la supresión de una fila de cilindros en la dirección ΓK . Al crear la guía existe un modo con polarización TM confinado en el defecto lineal con

5 frecuencias dentro de la banda prohibida, por lo que el defecto lineal actúa como guía de onda. También se puede crear una guía de cavidades acopladas (13) como la que se muestra en la Figura 4. En este caso se crea una cadena de cavidades y la propagación se debe a que los fotones saltan

10 entre cavidades vecinas debido al solapamiento de las colas del campo confinado en la cavidad. En el caso particular de la Figura 4 las cavidades se crean eliminando un cilindro de alto índice y la separación entre ellas es $d = 2a$ en la dirección ΓK . Del mismo modo que para la guía de onda (12),

15 resulta un modo guiado TM con frecuencias en el interior de la banda prohibida.

Si se sitúan dos guías de onda (12) en cristal fotónico 2D en proximidad como se muestra en la Figura 5 se

20 obtiene un acoplador. Debido a la proximidad entre las guías (12) el modo de una guía aislada se divide en dos modos para el acoplador con simetrías par e impar respecto al plano equidistante de los ejes de las guías paralelas (12). Estos modos tienen distintas constantes de

25 propagación, que por la periodicidad de la estructura en la dirección de las guías, se encuentran restringidas a la primera zona de Brillouin. La Figura 7 muestra la estructura de bandas para modos con polarización TM de la guía (12) descrita en la Figura 3 y de los modos del

30 acoplador descrito en la Figura 5 para una separación de un cilindro entre guías en la región de separación (14). El eje vertical representa frecuencias normalizadas en unidades de c/a siendo c la velocidad de la luz en el vacío. El modo guiado para la guía aislada se muestra en

35 línea discontinua (15), mientras que los modos par (16) e impar (17) del acoplador se muestran en línea continua.

-12-

Para la realización preferida los parámetros escogidos son:
 $\epsilon_1 = 10.3$, $\epsilon_2 = 1$, $r = 0.133a$. La transferencia de potencia entre guías del acoplador se produce en el margen espectral (18) en que coexistan los modos par e impar. Sin embargo
5 podemos ver dos intervalos espectrales (19) y (20) en los que existe solo el modo impar. Podemos utilizar ese intervalo en el que existe solo el modo impar para crear un divisor de potencia, ya que la señal viajará por las dos guías con una diferencia de fase de 180° e idéntica
10 potencia debido a la simetría impar. Sin embargo, debido a que las guías de cavidades acopladas (13) presentan mejores propiedades de transmisión a través de curvas cerradas que las guías (12), lo cual es de extrema importancia a la hora de inyectar y extraer las señales como se verá a
15 posteriori, para la realización preferida se tomará la estructura mostrada en la Figura 6, aunque el concepto subyacente para la invención que aquí se detalla es exactamente el mismo: excitar el modo impar de un acoplador en cristal fotónico en una región espectral en la que
20 exista sólo ese modo y separar espacialmente a la salida las dos guías que componen el acoplador para obtener dos señales con idéntica potencia y desfase de 180° .

En la Figura 6 se muestra un acoplador formado por dos
25 guías de cavidades acopladas (13). Las dos guías (13) están separadas por una región (14) que en este caso consiste de tres filas de cilindros de alto índice. La Figura 8 muestra la estructura de bandas de los modos guiados para polarización TM de la guía de cavidades
30 acopladas (13) y del acoplador de guías acopladas de la Figura 6 para una separación de una fila de cilindros de alto índice en la región entre guías (14). Como en la Figura 7, en el eje vertical se representan frecuencias normalizadas en unidades de c/a y en el horizontal
35 constantes de propagación reducidas a la primera zona de Brillouin. El modo guiado de la guía aislada se muestra con línea discontinua (21), y los modos par (22) e impar (23)

-13-

del acoplador como línea continua. Aquí se observa que los modos par e impar están mucho más desacoplados entre sí con respecto a las bandas del acoplador de la Figura 5. Esto es debido a que en el acoplador de la Figura 6, el acoplo es del mismo orden de magnitud en la dirección longitudinal de las guías (Γ_K) que en la transversal (Γ_M), mientras que en el acoplador de la Figura 5, el acoplo es mucho más fuerte en la dirección longitudinal debido a una menor separación entre cavidades contiguas. Así, tenemos una gran región espectral (24) en la que sólo existe el modo impar y que se puede utilizar para implementar el divisor de potencia con desfase de 180° . La región espectral donde solo existe el modo par (26) no es tan amplia y la región donde ambos modos coexisten es prácticamente despreciable (25) debido al alto desacoplo. Estos son los resultados para la realización preferida, pero se podría hacer un diseño en el que los modos par e impar no coexistieran en frecuencia y se dispondría de toda la región del modo impar (23) para implementar el divisor.

20

A partir de los resultados previamente presentados se presenta el método para dividir señales electromagnéticas con un desfase de 180° entre salidas. Este método se describe en la estructura mostrada en la Figura 9, para el caso particular de la realización preferida, de la que se mantienen los valores de los parámetros previamente utilizados. La parte central de la estructura divisora (31) es un acoplador de guías de cavidades acopladas como el mostrado en la Figura 6, con una separación de una fila de cilindros en la región (14). En el caso particular de la Figura 9 está compuesto de $N = 5$ cavidades a lo largo de la dirección de propagación. Para acceder a la estructura divisora (31) se emplean en esta realización particular guías de cavidades acopladas (13) debido a la alta eficiencia de transmisión en curvas cerradas que presentan. Así hay una guía de cavidades acopladas de entrada (28) y dos guías de cavidades acopladas de salida (29) y (30).

-14-

También se podrían utilizar guías (12) para los puertos de entrada y de salida. El margen espectral de funcionamiento del divisor será la intersección entre el rango (24) en el que solo existe el modo impar (23) y el rango en el que
5 existe un modo guiado (21) para las guías de entrada y de salida. Por eso, el intervalo de funcionamiento queda restringido al rectángulo punteado (27) en la Figura 8.

Para verificar el carácter de división de potencia y
10 desfasador de 180° del método propuesto, en la Figura 10 se muestra la simulación con un método de diferencias finitas en el dominio del tiempo de la distribución del campo eléctrico paralelo al eje de los cilindros para una onda monocromática de frecuencia normalizada 0.44 (que pertenece
15 al margen operativo del divisor). Al inyectar esta señal por el puerto de entrada (28), ésta llega a la sección del acoplador que en este caso consiste de $N = 6$ cavidades, y excita el modo impar. Los máximos del campo se muestran en tonos blancos y los mínimos en tonos negros. Se observa que
20 en la región de acoplo los máximos en una de las guías se corresponden con mínimos en la contigua, y viceversa, lo que confirma que el modo excitado es de simetría impar. A la salida se hace uso de la propiedad de periodicidad espacial del cristal fotónico 2D para dividir las guías del
25 acoplador en dos puertos de salida (29) y (30). La simetría impar se conserva en los puertos de salida, por lo que el desfase entre ellos es de 180° . Además, el camino que recorren ambas señales a través de la estructura es idéntico por lo que están sincronizadas. Esta propiedad es
30 muy importante, ya que se pueden utilizar señales de alta velocidad sin que haya retardo entre las salidas. Si por ejemplo, se piensa en implementar un divisor con un desfase de 180° a partir de un divisor de 90° , puede hacerse añadiendo un camino adicional en uno de los puertos de
35 salida que añada un desfase extra de 90° . Sin embargo, ese camino extra añadirá también un retardo de propagación no cumpliéndose la condición de sincronismo entre las señales

-15-

de salida a diferencia del método propuesto.

Para analizar el comportamiento en frecuencia del divisor se obtiene el espectro de transmisión de potencia de ambas salidas por medio de una simulación con un método de diferencias finitas en el dominio del tiempo. Los resultados se muestran en la Figura 11, para dos casos particulares de longitud del acoplador: $N = 4$ (35) y $N = 6$ (36). La respuesta (36) está desplazada 30 dB hacia abajo para una mejor apreciación. La línea continua es la respuesta para la salida (30) y la discontinua para la salida (29) en la Figura 10. Se observan tres intervalos espectrales de diferente comportamiento de la estructura: (32), (33) y (34). En el intervalo (32) ambas salidas tienen la misma potencia, lo que confirma que la estructura se comporta como divisor de potencia. El hecho de que la potencia de salida no sea constante con la frecuencia se debe a la contribución debida a reflexiones espurias por desadaptación modal entre las diferentes secciones de la estructura. Comparando con la Figura 8, podemos decir que este intervalo (32) se corresponde con el margen operativo del divisor. Esta es pues la región espectral de interés y en la que funciona la presente invención. A continuación se comentan las otras dos zonas espectrales (33) y (34) para comprobar la validez de la descripción previa de la estructura mostrada en la Figura 9. La zona (33) corresponde al intervalo (25) de la Figura 8 donde ambos modos par e impar son excitados. En este caso la potencia en ambos puertos de salida no tiene por qué ser idéntica, como se aprecia en la zona (33). Por otra parte, la zona espectral (34) corresponde al intervalo (26) de la Figura 8 donde solo existe el modo par, por lo que la potencia debe ser idéntica en ambas salidas, como se observa en la Figura 11, pero sin desfase entre señales. En cuanto a la influencia del número de cavidades N que componen la cavidad podemos decir que no afecta demasiado, y las respuestas (35) y (36) en la región (32) son muy parecidas

-16-

y muestran que ambos puertos de salida llevan la misma potencia. En principio, el divisor funciona bien a partir de $N = 2$, ya que para $N = 1$ las guías de salida (29) y (30) están muy cerca de la guía de entrada (28) y la zona (31) no actúa como un acoplador. Para $N > 1$ el divisor funciona correctamente y divide la señal de entrada en dos señales de salida de igual potencia y desfasadas 180° , y al crecer N el ancho de banda será mayor al disminuir el parámetro Q de la zona (31).

10

El método de simulación disponible no permite obtener medidas de fase por lo que se implementó en el laboratorio el divisor mostrado en la Figura 9 utilizando 300 barras de alúmina de constante $\epsilon_1 = 10.3$, altura 10 cm y radio 2mm.

15 Para generar las señales y realizar las medidas de amplitud y fase se usó un analizador de redes vectorial de hasta 50 GHz. Para que $r = 0.133a$ como en las simulaciones se escogió $a = 1.5$ cm. Para el cristal sin defectos tal como se muestra en la Figura 2 y para una señal polarizada en TM

20 se observó una banda prohibida entre 7.36 y 11.7 GHz en la dirección ΓK . A continuación se introdujo una guía como la de la Figura 4 y se observó una banda guiada para polarización TM entre 8.53 y 9.05 GHz. Esta banda guiada se corresponde al modo (21) en la Figura 8. Después se

25 introdujo el divisor mostrado en la Figura 9 con $N = 4$ cavidades y se realizaron medidas de transmisión de amplitud y fase que se muestran en la Figura 12. La respuesta en amplitud se muestra en línea continua (37) para el puerto de salida (29) y en línea discontinua (38)

30 para el puerto de salida (30). La respuesta en fase se muestra en línea continua (39) para el puerto de salida (29) y en línea discontinua (40) para el puerto de salida (30). Se muestran también las tres zonas espectrales (32), (33) y (34) de diferente comportamiento del divisor ya

35 incluidas en la Figura 11. La zona (32) es la que corresponde al divisor de 180° , y en la respuesta en fase

-17-

se observa que la diferencia en fase entre las dos salidas (50) y (51) es de 180° aproximadamente en todo el rango. La diferencia en las respuestas en amplitud (37) y (38) en el rango espectral (32) se deben a imprecisiones en la implementación de la estructura, reflexiones externas no deseadas así como a desadaptación modal entre las diferentes secciones del divisor. El rango del divisor de 180° ocupa un ancho espectral de unos 300 MHz, es decir, un ancho de banda relativo de 3.45 %, suficiente para numerosas aplicaciones. A modo de ejemplo, en la banda óptica de 1550 nm, usada en comunicaciones ópticas, se obtendría un ancho de banda superior a 50 nm, apto para aplicaciones en redes ópticas de multiplexación por división en longitud de onda. En el rango (33) ambos modos par e impar son excitados, y no hay un comportamiento estable de las salidas de amplitud y fase. Por último la región (34) correspondería a la zona de excitación del modo par, lo que se confirma si observamos la respuesta en fase de la estructura donde vemos que (39) y (40) están en fase es ese intervalo. La respuesta en amplitud para la región (34) muestra un equilibrio en la potencia de salida por ambos puertos (29) y (30). La potencia total en la región de excitación del modo par (34) es menor que en la región de excitación del modo impar (32) debido a que el modo par (22) es más plano en frecuencia que el modo impar (23), por lo que habrá mayor desadaptación modal y una menor eficiencia global de transmisión.

30

35

-18-

REIVINDICACIONES

1.- Método para dividir una señal electromagnética guiada en dos señales con la mitad de potencia utilizando
5 cristales fotónicos caracterizado porque se basa en excitar un acoplador realizado al colocar en proximidad dos guías paralelas de cavidades acopladas implementadas en cristales fotónicos, en el que las dos guías están físicamente separadas y se pueden curvar apropiadamente para extraer
10 las dos señales a la salida, señales de salida que recorren el mismo camino físico por lo que no se produce retardo entre ellas.

2.- Método para dividir una señal electromagnética
15 guiada en dos señales con la mitad de potencia utilizando cristales fotónicos según reivindicación 1 caracterizado porque se basa en excitar el modo impar del acoplador obteniendo a la salida dos señales desfasadas 180°.

20 3.- Método para dividir una señal electromagnética guiada en dos señales con la mitad de potencia utilizando cristales fotónicos según reivindicación 1 caracterizado porque se basa en excitar el modo par del acoplador diseñado con mayor ancho de banda obteniendo a la salida
25 dos señales en fase.

4.- Método para dividir una señal electromagnética guiada en dos señales con la mitad de potencia utilizando
30 cristales fotónicos según reivindicaciones 1, 2 y 3 caracterizado porque puede emplearse cualquier tipo de cristal 2D.

5.- Método para dividir una señal electromagnética guiada en dos señales con la mitad de potencia utilizando
35 cristales fotónicos según reivindicaciones 1, 2 y 3 porque puede emplearse cualquier tipo de cristal 3D.

-19-

6.- Método para dividir una señal electromagnética guiada en dos señales con la mitad de potencia utilizando cristales fotónicos según reivindicaciones 1, 4 y 5 caracterizado porque es de aplicación para un cristal
5 fotónico con tipo de red triangular.

7.- Método para dividir una señal electromagnética guiada en dos señales con la mitad de potencia utilizando cristales fotónicos según reivindicaciones 1, 4 y 5
10 caracterizado porque es de aplicación para un cristal fotónico con tipo de red cuadrada.

15

20

25

30

35

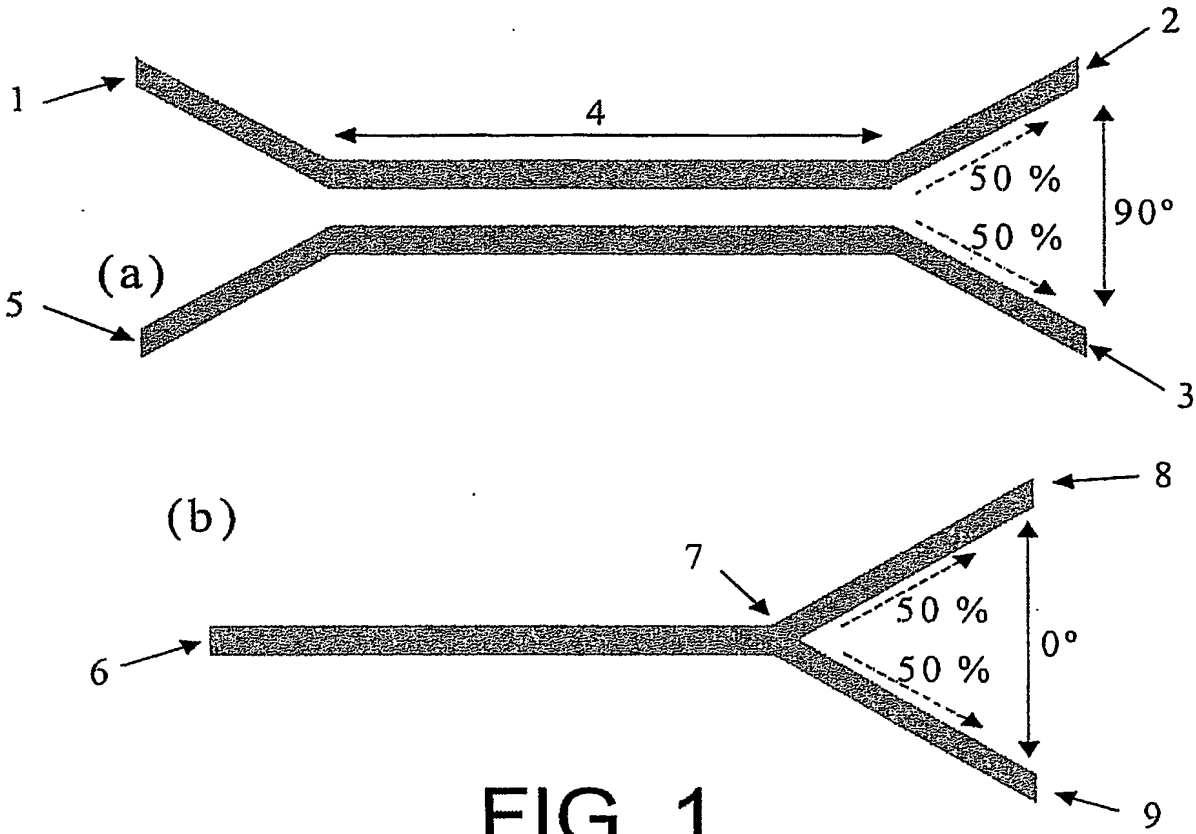


FIG. 1

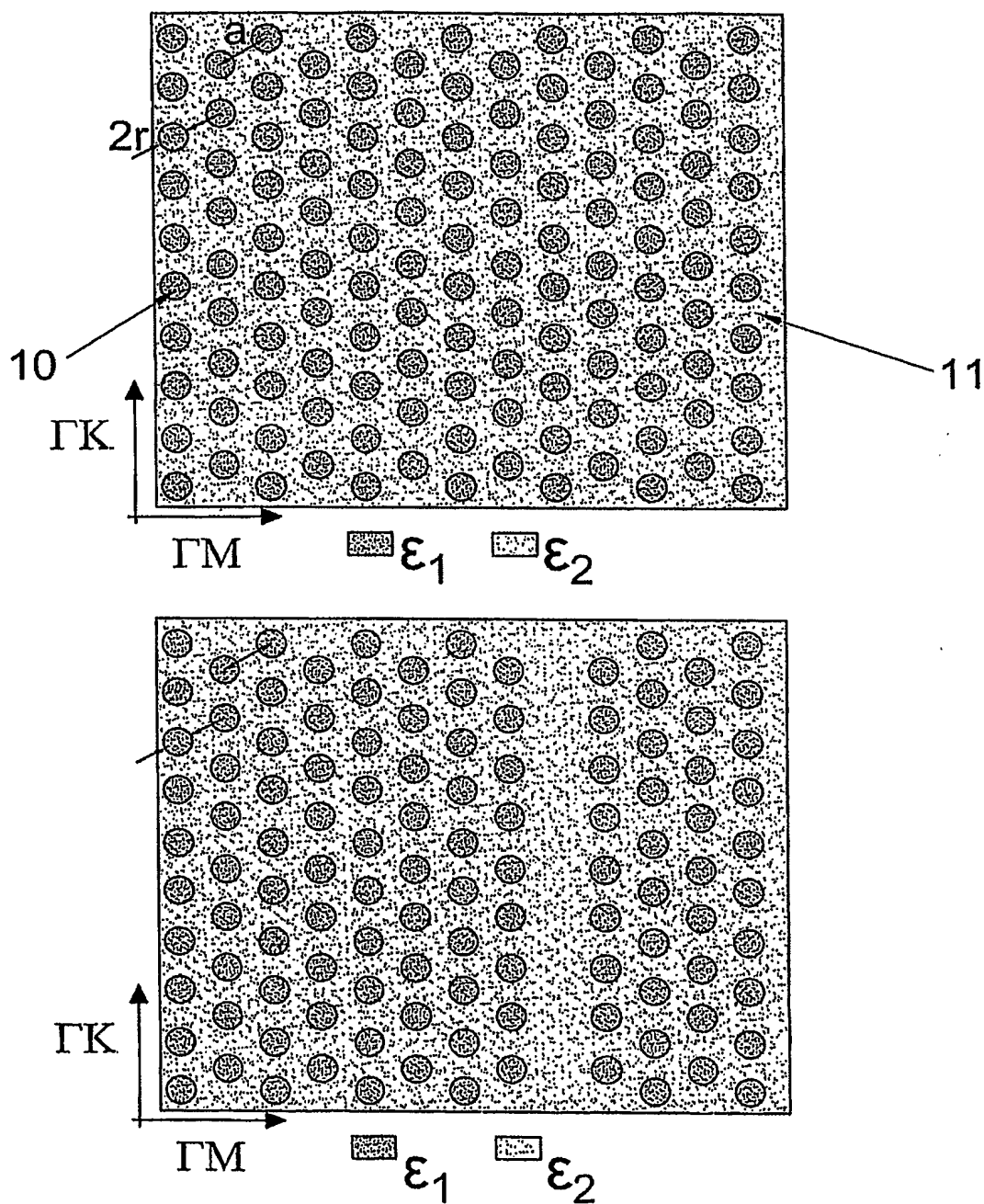


FIG. 2

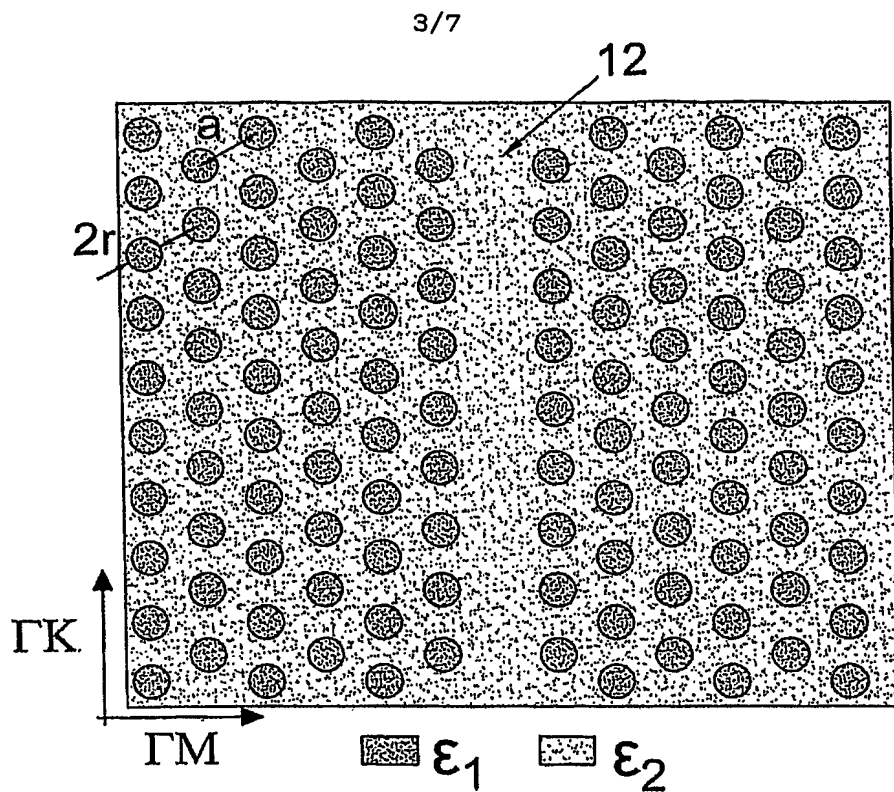


FIG. 3

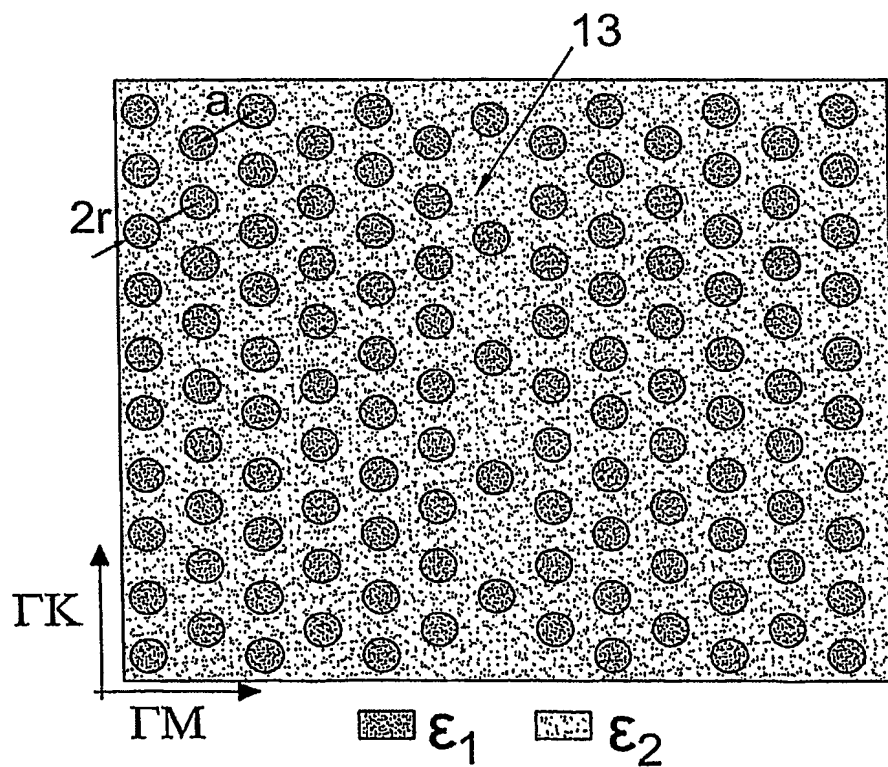
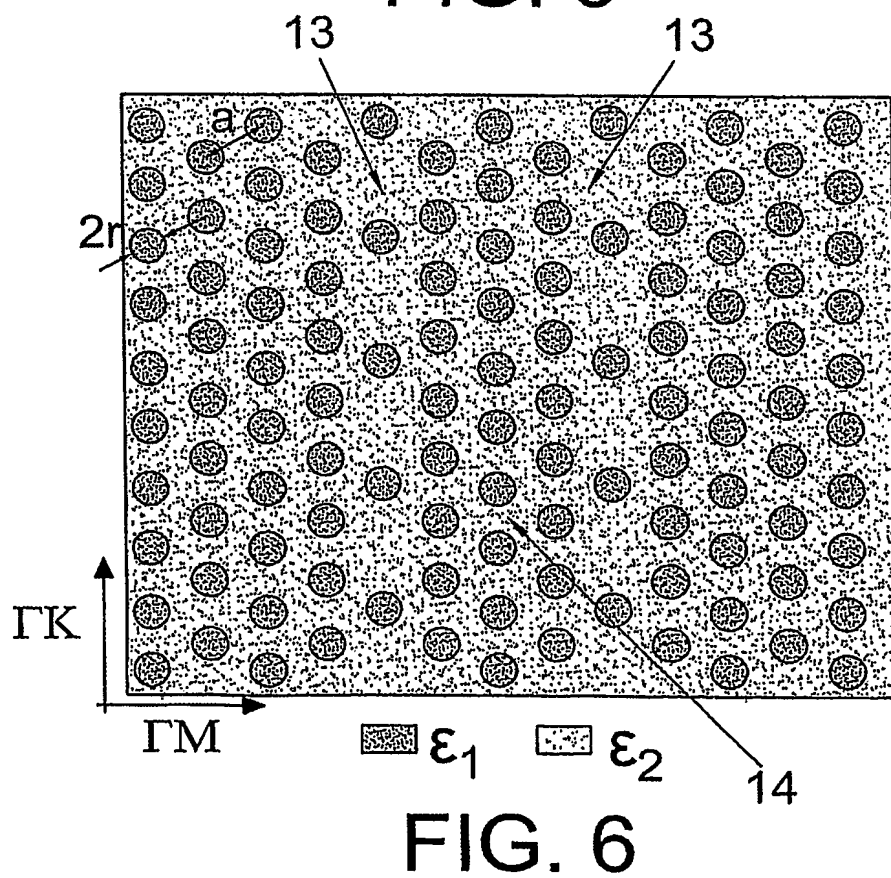
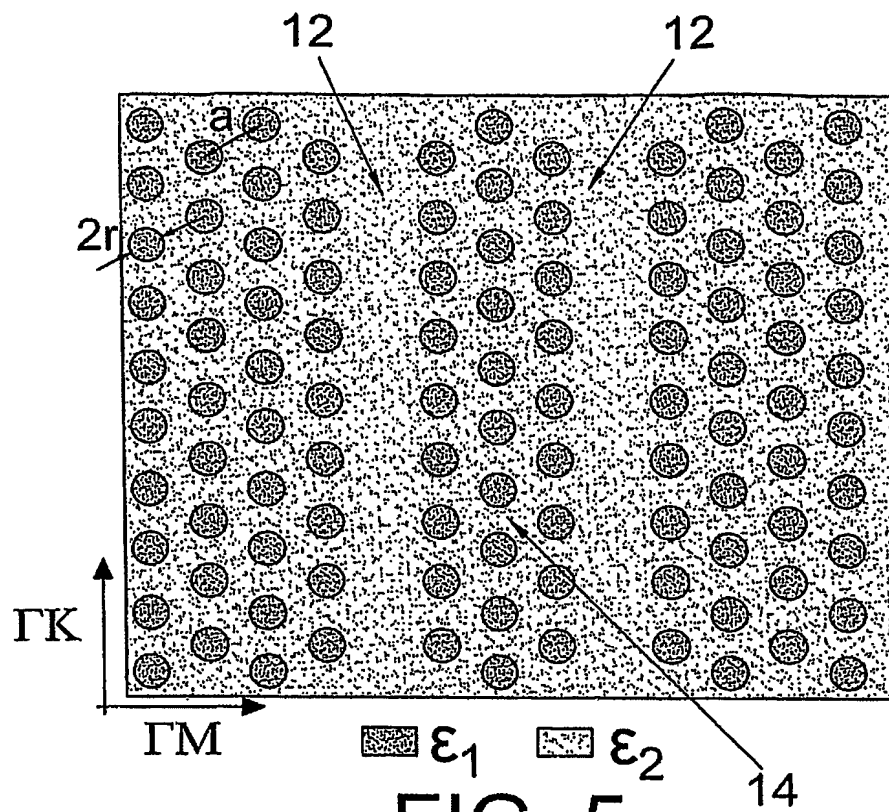


FIG. 4

4/7



5/7

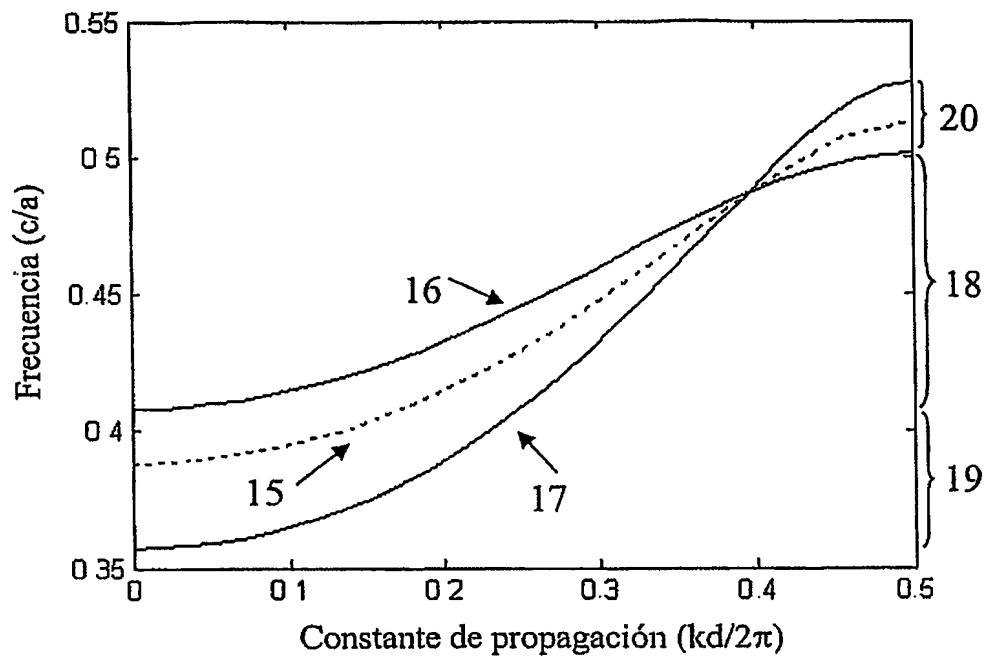


FIG. 7

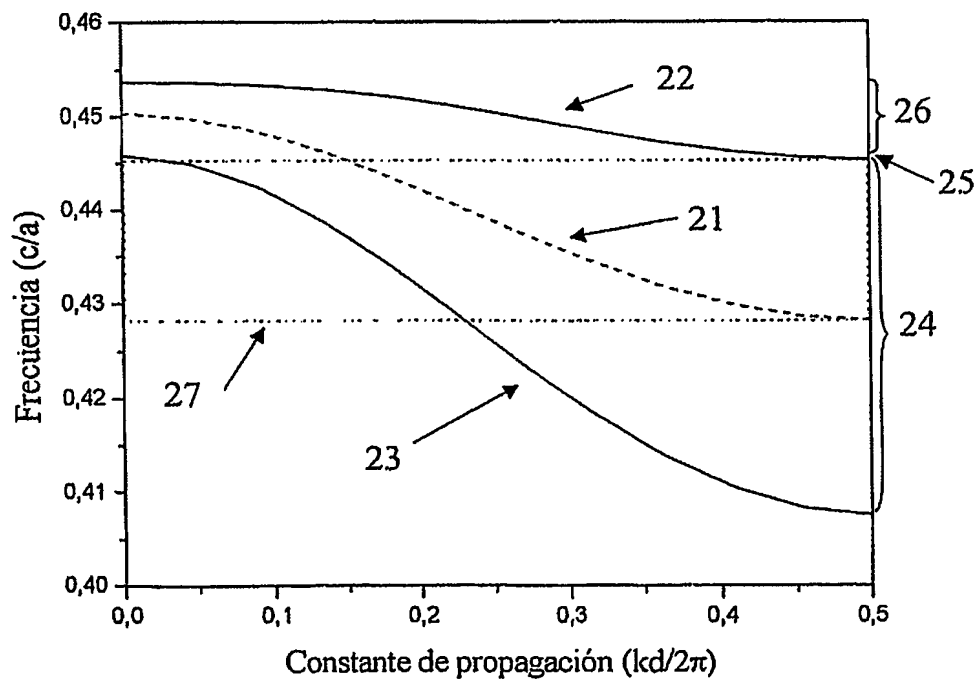


FIG. 8

6/7

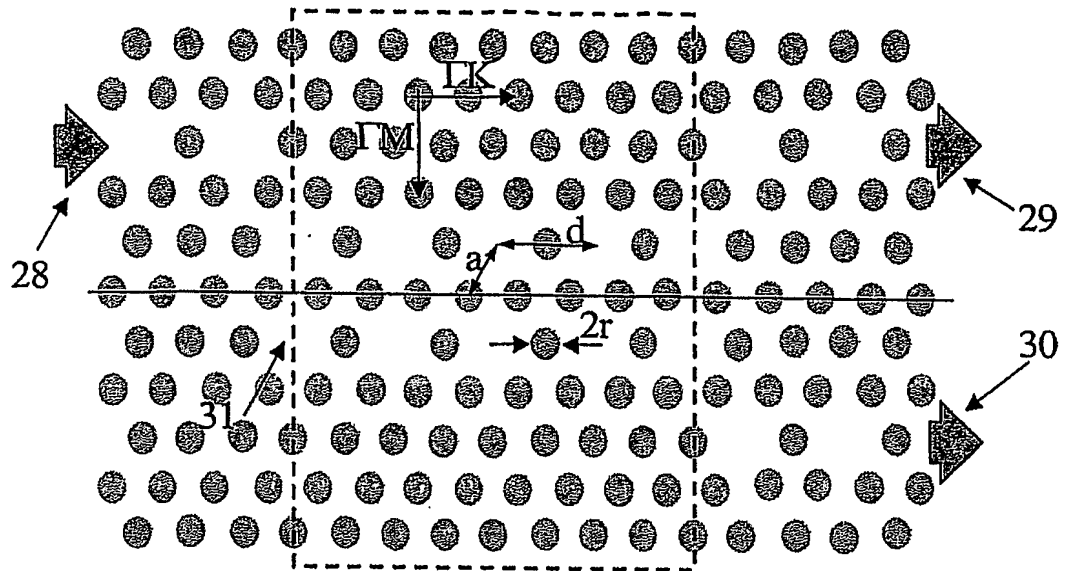


FIG. 9

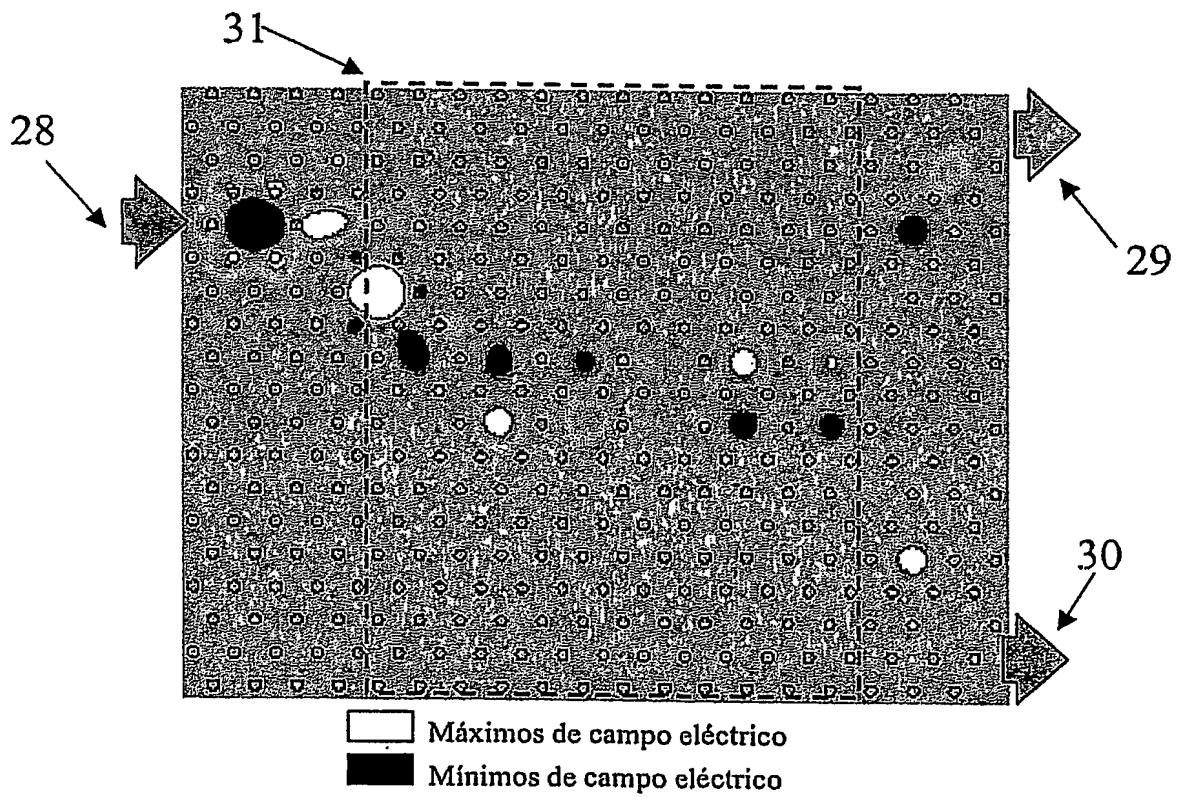


FIG. 10

7/7

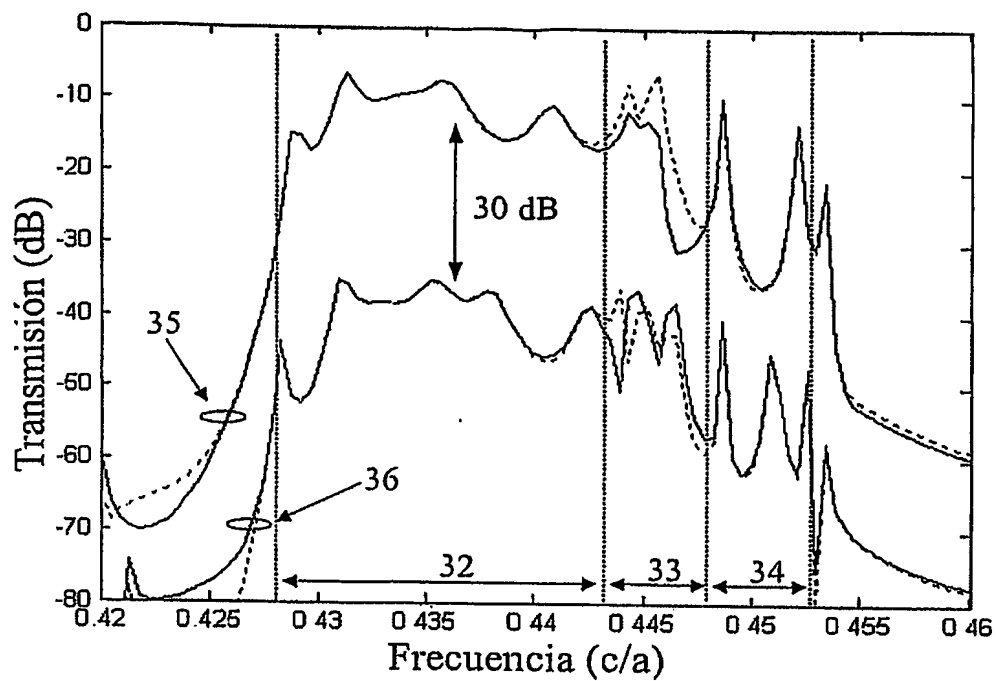


FIG. 11

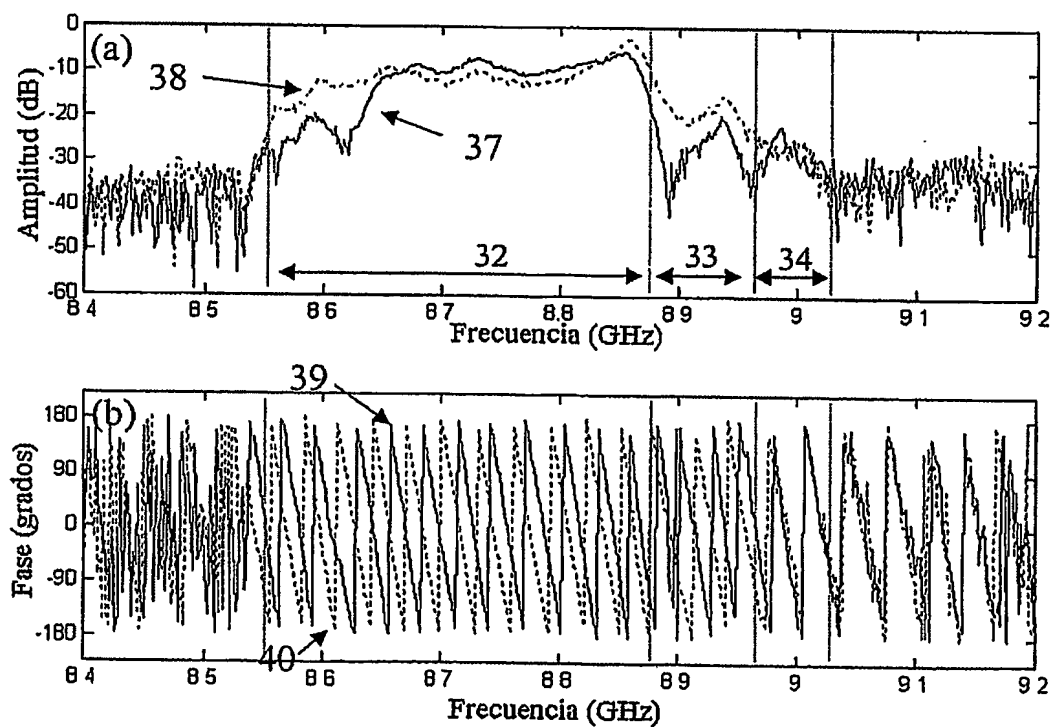


FIG. 12